



Facultad de Ciencias Exactas
Departamento de Ciencias Física

A New Galactic Bulge Globular Cluster from the VVV Survey

***Nuevo Cumulo Globular del Bulbo Galáctico con Datos del
VVV***

Tesis para obtener el grado de Magíster en Astrofísica

Autor:

Matías Chijani Saballa

Profesor Guía:

Dr. Dante Minniti

Comisión Evaluadora:

Dr. Matías Gomez Camus

Dr. Lorenzo Monaco

Dr. Bruno Días

Santiago de Chile, 2019

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	viii
Agradecimiento	ix
Abstract	10
1. Introducción	
1.1 ¿Por qué los Cúmulos Globulares del bulbo son interesantes?	11
1.2 Trabajos anteriores de fotometría IR de Cúmulos Globulares en el bulbo de la MW	13
1.3 Organización de la tesis	13
2. Datos	
2.1 Fotometría óptica	14
2.2 Observaciones del survey VVV	16
2.3 Fotometría para estrellas brillantes en el 2MASS	18

2.4	Fotometría de WISE	18
2.5	Fotometría y movimientos propios de Gaia	19
3.	Resultados	
3.1	Mediciones de enrojecimiento y absorción	23
3.2	Determinación de la distancia	27
3.3	Ajuste de isócrona y determinación de la metalicidad y edad	28
3.4	Determinación del radio	28
3.5	Determinación de la luminosidad	30
4.	Discusión	
4.1	Problemas con la medición del enrojecimiento y la ley de extinción	31
4.2	Problemas en determinar distancias con distintos métodos.	31

4.3	Problemas en la determinación del tamaño y la contaminación de fondo	33
4.4	Problemas con la determinación de la edad y luminosidad.	33
5.	Conclusiones	35
6.	Referencias	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Muestra la fotometría con 3 arcmin del Cúmulo (*Ascensión recta (RA)*, *Declinación (DEC)*, *longitud galáctica (L)*, *latitud galáctica (B)*, *Magnitud en la banda G*, *Color (Bp-Rp)*, *Magnitud en las bandas Z, Y, J, H, Ks, W1, W2, W3, W4*)

15

Tabla 2: Muestra las propiedades físicas para el nuevo Cumulo Globular (*Ascensión recta (α)*, *Declinación (δ)*, *Enrojecimiento $E(J - K_s)$* , *Extinción (A_k)*, *Distancia $D(Kpc)$* , *Metalicidad (Z)*, *Edad*, *Radio*, *Luminosidad*)

26

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Finding Chart (*FC*) del cúmulo Minni48 con un campo de visión de 32 x 32 arcmin en las coordenadas $l = 359.35131400$, $b = 2.79026059$ (Aladin Sky Atlas – v10.0) en las bandas AllWISE color W4,W2,W1 (Derecha) ,VISTA VVV DR4 H Bulge (izquierda)

12

Figura 2: El Diagrama Color Magnitud (DCM) de Minni48 K_s vs. $(J-K_s)$. De los datos obtenidos por el VVV en el infrarrojo cercano en el bulbo galáctico

14

Figure 3: DCM $W1$ vs. $(W1-W2)$. De los datos obtenidos por WISE en el infrarrojo cercano para el cúmulo Minni48 en la región del bulbo galáctico.

17

Figure 4: DCM $Gmag$ vs. $(BP-RP)$. De los datos obtenidos por Gaia en el óptico para el cúmulo Minni48 en la región del bulbo galáctico.

19

Figure 5: Movimientos propios de los datos obtenidos por Gaia en el óptico para el cúmulo Minni48 con coordenadas: $l = 359.35131400$ $b = 2.79026059$.

21

Figure 6: CMD K_s vs. $(Gmag-K_s)$. De los datos obtenidos por Gaia y VVV en el óptico e infrarrojo cercano para el cúmulo Minni48 en la región del bulbo galáctico

22

Figure 7: El gráfico muestra el CMD de Minni48 y la isócrona de PARSEC en las bandas $(J-K_s)$ vs K_s . (Izquierda, la isócrona seleccionada arbitrariamente por ajuste visual. Centro, isócronas de igual edad, pero distintas metalicidades $Z \sim 0.05$ y $Z \sim 0.035$. Derecha, isócronas de igual metalicidad, pero distintas edades de 9 – 12Gyr).

24

Dedicatoria

Especial dedicación a mi abuelo Luis Alejandro Saballa, quien hubiera leído esta tesis feliz y a gusto.

Dedico el presente trabajo de investigación a todos mis profesores a cargo de mi formación académica a lo largo de los años, a todos los que ayudaron a facilitar mi investigación compartiendo todos sus conocimientos conmigo. A todas las personas especiales que me acompañaron en esta etapa de formación humana y profesional.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a muchas personas y compañeros que han estado presente en este proceso de investigación. En primer lugar, agradecer a Francisca Troncoso por ser un pilar fundamental en mi vida, por estar presente en este proceso y en mi vida personal, por prestarme la ayuda necesaria cuando lo necesite, por animarme cuando más lo necesite, a mi familia por todo su apoyo incondicional, a mi tutor, Dante Minniti, por haberme orientado en este trabajo de investigación.

Agradecer a todos mis amigos y compañeros, que me acompañaron en todo mi proceso universitario y me ayudaron de forma desinteresada.

De manera especial a mis compañeros Favio Neira, Tracy Catalan y Yordanka Apostolovski por ser un apoyo en mi formación universitaria y personal.

A Timo Anguita por ser de los primeros profesores en mi formación universitaria y profesional, por todo su apoyo y consejos a lo largo de los años.

A todos los docentes que compartieron su sabiduría y conocimientos conmigo en la Universidad Andrés bello. Agradecimiento infinito a todos ellos.

Abstract

El VVV es uno de los surveys contemporáneos que opera en el infrarrojo cercano, observa la MW y sectores aledaños en 5 bandas distintas. Uno de sus objetivos es completar el catálogo de cúmulos globulares de distinta población estelar.

Usando los datos del VVV, 2MASS, WISE y Gaia analizamos la fotometría en un radio de 3 arcmin desde el centro del cumulo, examinamos su DCM en las bandas J-Ks.

Trataremos de confirmar un nuevo cúmulo globular en el infrarrojo cercano, altamente enrojecido, de edad 11 Gyr que esta a una distancia aproximadamente de 7kpc. De este cúmulo obtuvimos sus parámetros fundamentales como la distancia, edad, metalicidad, luminosidad y radio usando el método de ajustar isócronas en el DCM.

Sera necesario estudios a futuro para acelerar el proceso de confirmación de este cumulo, será necesario otras técnicas de medición para la distancia y descontaminación de estrellas.

Palabras claves: DCM (Diagrama Color Magnitud), CG (Cúmulo Globular), Minni48, VVV, 2MASS, WISE, Gaia, MW (Milky Way), FC (Finding Chart)

Introducción

1.1 ¿Por qué los Cúmulos Globulares del bulbo son interesantes?

Los Cúmulos globulares (CG) son sistemas estelares que están fuertemente ligados debido a la gravedad. Estos objetos son los más antiguos conocidos en la MW, están formados en su mayoría por un grupo estelar de la misma generación o etapa evolutiva, tienen una población química homogénea descrita por [N. Suntzeff \(1993\)](#), su formación está ligado con el origen de la galaxia y debido a esta propiedad son altamente estudiados para obtener información acerca de la estructura, procesos dinámicos-químicos y la física de la galaxia huésped, [Savino & Posti \(2019\)](#) analizan las propiedades orbitales del halo de estrella que es compatible con el escenario de escape orbital de los cúmulos globulares.

El estudio de los CG en el área central (bulbo) de la galaxia, nos permite estudiar la estructura, distribución espacial, formación, evolución, la cinemática, las órbitas, las metalicidades y la dinámica química de esta región. Debido a que los CG cuentan con propiedades de distribución espacial, formación y cinemática, son la clave para develar la estructura y formación del bulbo de la galaxia, [N.R. Arakelyan et al. \(2018\)](#) analiza la distribución espacial de los CG en la galaxia.

El centro galáctico es abundante en gas y polvo, lo que resulta en 30 magnitud de extinción a longitudes de ondas visibles. Claramente se dificulta la observación de cuerpos estelares en estas bandas, donde una de las más utilizadas para este tipo de observación es la banda K (centrada en $2,2\mu m$). A lo largo de los años contamos con varios surveys que han hecho posible el estudio de la región, como 2MASS, VVV, WISE y los datos recientes de Gaia. La combinación de estos surveys nos permite obtener una información más completa de los objetos estudiados tanto en el presente como en el pasado. El estudio de estos diferentes CG nos permitirá tener una base robusta y estadística de los parámetros físicos del bulbo galáctico.

En este estudio nos centraremos en la confirmación del candidato a CG Minni48 ([Figura 1](#)) en el área del bulbo de la MW observado por el VVV.

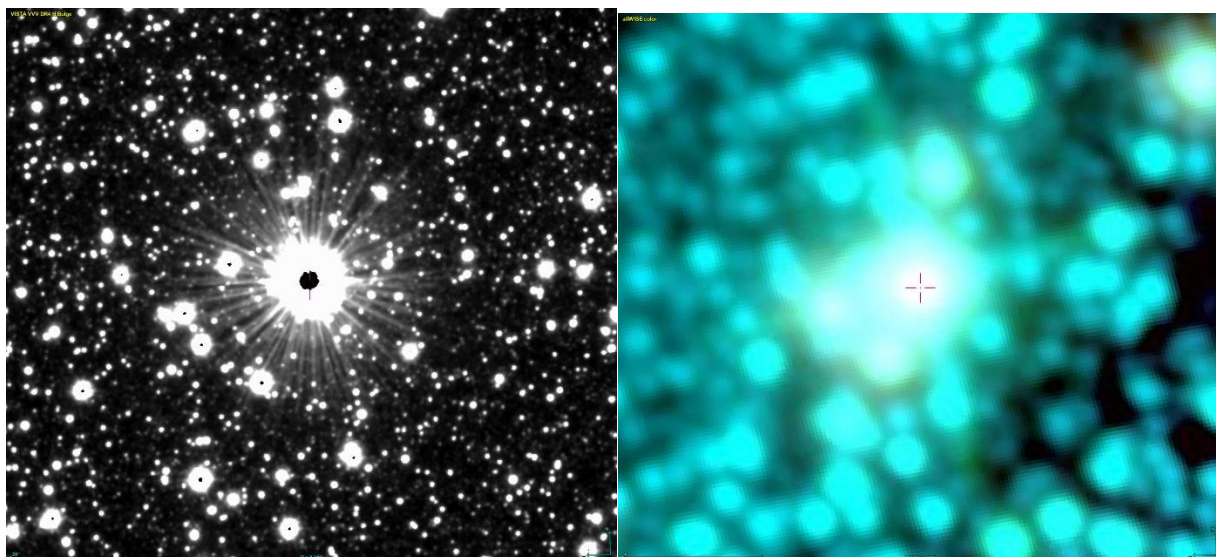


Figura 1: Finding Chart (*FC*) del cúmulo Minni48 con un campo de visión de 3 x 3 arcmin en las coordenadas $l = 359.35131400$, $b = 2.79026059$ (Aladin Sky Atlas – v10.0) en las bandas AllWISE color W4, W2, W1 (Derecha) ,VISTA VVV DR4 H Bulge (izquierda)

1.2 Trabajos anteriores de fotometría IR de Cúmulos Globulares en el bulbo de la MW

Trabajos anteriores como [Camargo et al. \(2018\)](#) o [Minniti et al. \(2017\)](#), pudieron encontrar y clasificar candidatos a CG. El primero descubrió 5 nuevos GC (viejos y pobres en metales) en el bulbo galáctico gracias a los surveys WISE, 2MASS y la fotometría de Gaia (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>). El segundo descubrió 22 nuevos candidatos a CG (pobres en metales y ricos en metales), la caracterización y la detección de los objetos han llevado a complementar la formación estelar de la región y entender la estructura interna de la galaxia.

1.3 Organización de la tesis

La organización de este estudio se llevará de la siguiente forma: La Sección 2 describe la observación y el procesamiento de los datos obtenidos en la región por el VVV, la fotometría de 2MASS, WISE, Gaia, óptica y los movimientos propios de Gaia. La Sección 3 describe los resultados y determinación de parámetros como el enrojecimiento, absorción, distancia, metalicidad, edad, radio, luminosidad e isócronas. La Sección 4 discute los problemas relacionados con el enrojecimiento, ley de extinción, distancia usando diferentes métodos, determinación del tamaño, la contaminación del fondo y problemas relacionados con la edad y la luminosidad. La Sección final resume los resultados de un nuevo CG en el bulbo galáctico, se presentan las conclusiones de estos y los parámetros físicos estudiados.

Datos

2.1 Fotometría óptica

La fotometría se realiza registrando la luz proveniente del detector que ha pasado por filtros ópticos de un rango de longitud de onda seleccionado, los que permiten tener diferentes partes del espectro de un objeto. Es útil para tener información acerca de la forma del espectro observado, especialmente en fuentes débiles. Se define la passband como una combinación de efectos entre los filtros, transmisión, camino óptico y eficiencia cuántica del detector como función de la longitud de onda. Al aplicar la función a un instrumento dado y a un espectro de objeto, se obtiene la magnitud correspondiente en la passband ([Ver Jordi et al. \(2010\)](#)). La fotometría de dos surveys VVV (infrarrojo) y Gaia (óptico) se puede apreciar en la [Figura 2](#).

Todos los datos de fotometría y posición de los surveys están recopilados en la [Tabla 1](#).

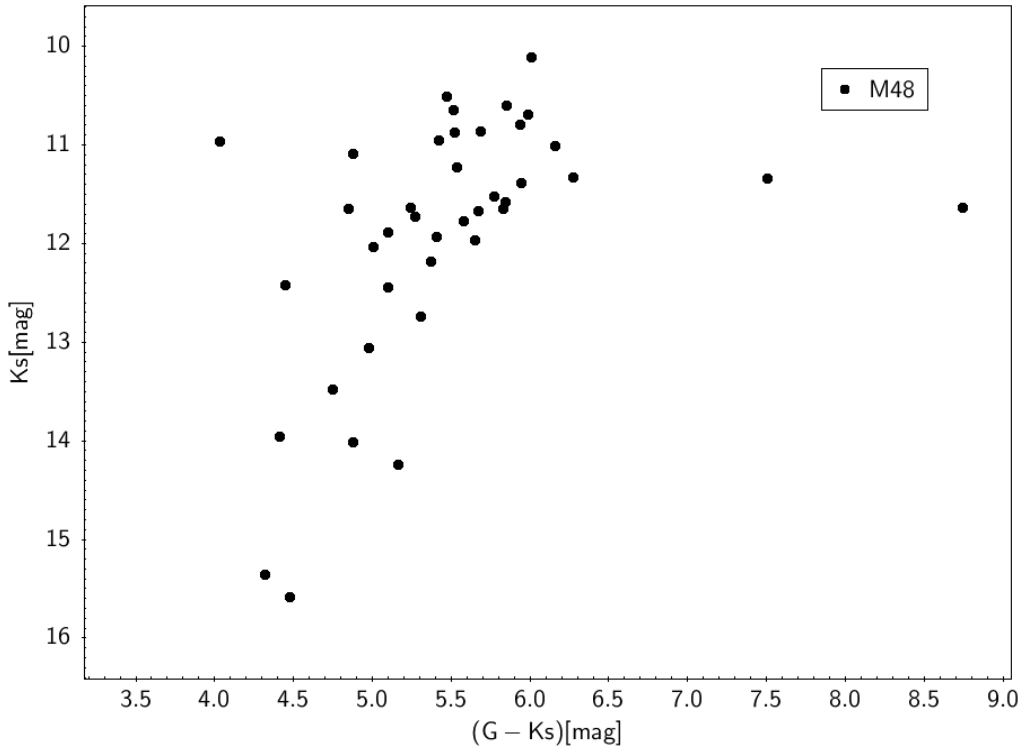


Figura 2: CMD K_s vs. $(G_{\text{mag}} - K_s)$. De los datos obtenidos por Gaia y VVV en el óptico e infrarrojo cercano para el cúmulo Minni48 en la región del bulbo galáctico.

Tabla 1: Muestra la fotometría con 3 arcmin del Cúmulo (*Ascensión recta (RA), Declinación (DEC), longitud galáctica (L), latitud galáctica (B), Magnitud en la banda G, Color (Bp-Rp), Magnitud en las bandas Z, Y, J, H, Ks, W1, W2, W3, W4*)

RA	DEC	L	B	Gmag	Bp-rp	Z	Y	J	H	Ks	W1	W2	W3	W4
263.352234837828	-28.0465533927901	359.325759	2,745020	18,377470		16,257	15,717	15,057	14,159	13,964	10,903	10,991	11,502	8,671
263.338409732512	-28.0478659868969	359.317850	2,754622	17,601704		14,707	13,891	12,803	11,910	11,328	10,482	10,741	10,860	8,059
263.319053183050	-27.9636971122568	359.379281	2,814382	20,060728	3,9468030	17,989	17,390	16,755	15,781	15,583	10,186	10,329	8,4740	4,961
263.358478387328	-28.0438746464943	359.331014	2,741826	18,891333		15,494	14,811	13,911	12,630	12,417	10,009	10,311	10,533	9,009
263.370212681029	-28.0238983971379	359.353255	2,743910	18,854385		16,638	16,028	15,235	14,345	14,013	10,984	11,075	11,974	8,134
263.368472353815	-28.0221320435647	359.354091	2,746230	17,349773		14,327	13,658	12,747	11,812	11,345	10,693	10,939	11,608	7,986
263.296294607110	-28.0401290403834	359.304319	2,789971	17,004068	3,0348825	14,902	14,170	13,226	12,195	11,768	10,760	11,074	11,323	8,571
263.292180173683	-28.0374218097794	359.304619	2,794494	17,169006	3,9752293	14,511	13,633	12,565	11,706	11,011	10,859	11,364	11,698	8,859
263.300028001142	-28.0402239675546	359.306027	2,787156	16,493761	2,8510380	14,254	13,633	12,798	12,043	11,643	10,465	10,721	10,747	8,900
263.364723126456	-28.0102744454779	359.362262	2,755443	17,553717	3,1208496	15,199	14,506	13,629	12,582	12,182	11,617	12,388	11,818	8,932
263.313625146449	-28.0332807950621	359.318394	2,780841	18,226938		15,959	15,406	14,628	13,721	13,480	9,8400	10,050	10,489	8,881
263.312349123930	-28.0485584215163	359.304939	2,773497	16,728022	3,8207770	14,159	13,349	12,320	11,705	10,791	10,436	10,746	11,061	8,925
263.324021484185	-28.0382257527862	359.319222	2,770450	19,673410		17,500	17,066	16,321	15,667	15,356	10,367	10,565	10,665	8,238
263.323616732021	-28.0432305462074	359.314822	2,768042	16,676250		14,085	13,236	12,212	11,575	10,687	9,9080	10,219	10,750	8,560
263.362634569864	-28.0093318728613	359.362055	2,757502	17,617016	3,3086700	15,119	14,381	13,440	12,387	11,967	11,274	11,755	11,727	8,888
263.370674197560	-28.0083686365945	359.366721	2,752062	16,988752	2,9599648	14,704	14,062	13,212	12,219	11,888	11,489	11,933	11,837	8,836
263.353406492293	-28.0173010320644	359.350921	2,760020	16,124908	3,9919558	13,523	12,677	11,690	99,999	10,112	9,7500	9,9870	10,383	8,801
263.312497887056	-27.9852608719420	359.358821	2,807748	16,165838	3,6661615	13,657	12,854	11,869	99,999	10,651	9,9020	10,004	9,4270	7,433
263.366587613355	-28.0254219067602	359.350416	2,745842	17,342524	2,9253970	14,922	14,244	13,349	12,321	11,936	11,917	13,030	12,085	8,785
263.373899074602	-28.0072623254264	359.369197	2,750272	16,880530	3,0141134	14,550	13,884	13,001	12,021	11,639	11,435	11,946	11,843	8,772
263.337500579766	-28.0367161151053	359.326961	2,761272	15,975535	3,2708645	13,596	12,882	11,942	99,999	10,506	10,101	10,308	9,8410	7,925
263.361507782698	-28.0148221018988	359.356896	2,755358	16,374641	3,2448301	13,999	13,280	12,343	11,529	10,953	10,522	10,780	11,567	8,848
263.357101484880	-28.0359679869397	359.336998	2,747150	15,003958	2,5094995	12,847	12,327	12,078	11,568	10,969	10,298	9,9780	6,1200	3,108
263.369328571813	-28.0302704388411	359.347641	2,741177	16,763365	3,2327127	14,234	13,530	12,634	11,700	11,223	10,785	11,108	11,790	8,838
263.300115254570	-27.9572030090974	359.375867	2,832174	18,051077		15,698	15,022	14,070	13,075	12,743	9,8560	10,019	10,458	9,141
263.291057673319	-27.9611168989579	359.368224	2,836766	17,548641		15,271	14,639	13,722	12,763	12,450	11,049	11,245	12,091	8,676
263.366605602356	-27.9828360303047	359.386237	2,768941	18,033476		15,744	15,100	14,285	13,393	13,056	10,939	11,092	9,4580	6,298
263.301719470558	-27.9602578494107	359.374066	2,829320	17,295742	3,4833030	14,834	14,064	13,075	11,983	11,523	10,715	10,925	11,260	8,919
263.377930061943	-27.9967651235743	359.380164	2,753062	20,380518		14,785	14,064	13,124	12,069	11,635	11,591	12,143	11,881	8,724
263.351305536476	-27.9748201009413	359.385635	2,784636	15,970775	2,9037933	13,726	13,110	12,291	11,595	11,090	10,753	11,165	12,125	9,049
263.339827052093	-27.9667687668196	359.386896	2,797519	16,546790	3,3595304	14,090	13,338	12,355	11,505	10,858	10,510	10,648	10,677	8,411
263.326058661930	-27.9522987409305	359.392472	2,815583	17,328955	3,5116377	14,678	13,897	12,907	11,878	11,383	11,481	11,959	11,550	8,876
263.361951319142	-27.9664641473506	359.397780	2,781273	17,484262	3,2970018	14,972	14,181	13,183	12,107	11,654	11,118	11,420	11,154	8,976
263.379731821401	-28.0048218785356	359.374047	2,747258	19,400833		16,956	16,375	15,516	14,545	14,239	10,213	10,416	10,545	8,900
263.316477453019	-27.9547199435185	359.385814	2,821382	16,391531	3,3452072	13,976	13,230	12,278	11,439	10,870	10,581	10,869	10,995	8,776
263.372436254912	-28.0012289117677	359.373569	2,754629	17,344027	3,4007473	14,863	14,107	13,152	12,104	11,669	11,712	14,112	11,927	8,917
263.358278405037	-27.9695885943177	359.393384	2,782305	17,040940	2,8675318	14,759	14,131	13,297	12,356	12,035	11,453	11,693	11,711	8,912
263.339647414254	-27.9697517928965	359.384302	2,796036	16,450918	3,4245377	13,963	13,176	12,158	11,359	10,602	10,083	10,339	10,848	8,891
263.364897543465	-27.9928052720287	359.377034	2,764793	17,425146	3,3064500	14,939	14,155	13,156	12,060	11,578	11,381	11,939	11,412	8,891

2.2 Observaciones del survey VVV

El survey VVV (The VISTA Variable in The Via Láctea) cubre cerca de 528 deg^2 en el área del bulbo, los cuales contienen alrededor de 10^9 fuentes y más de 2000 horas de ejecución. Cuenta con una gama de longitudes de ondas Z, Y, J, H y Ks en el infrarrojo cercano, que van desde 0.84 a $2.5 \mu\text{m}$. Para los datos del cúmulo minni48 se utilizó las bandas J y Ks donde Ks ~ 18 mag la magnitud límite y con una razón de señal/ruido de 3. Los datos son apreciados en el DCM en la [Figura 3](#).

Los datos del VVV complementan otros surveys como el 2MASS (The Two Micron All-Sky Survey) con fotometría en las bandas J, H, K. Estos datos son excelentes en cuanto a calidad y solo una pequeña parte de éstos no pasaron el control de calidad (Nos referimos a la calidad de la ejecución, en cuanto a defectos de imágenes, problemas del telescopio, seeing, zero point, límite de magnitud, elipticidad, masa de aire, etc.), por lo que tuvieron que ser medidos nuevamente, descrito por [Saito et al. \(2012\)](#). El VVV agrega 2 bandas (Z, Y) al 2MASS, lo que complementa ya la información obtenida de distribución de estrellas, población estelar y la interacción entre ellas en las bandas J, H, K.

Las observaciones obtenidas del VVV fueron procesadas en el VDFS (VISTA data flow system) y en el CASU (Cambridge Astronomy Survey Unit). Los datos son puramente de apertura fotométricas y no profundos, pero hay técnicas que nos permiten obtener una mayor profundidad, usando la fotometría PSF en las imágenes del VVV que nos permiten detectar casi el doble de fuentes. Esta técnica nos permite llegar 1.5 mag más profundo, para resolver las áreas con densidades más altas de estrellas, descrito por [Saito et al. \(2012\)](#).

Los datos obtenidos son del catálogo VVV: ZYJHKs Catalogue in the Via Lactea (<https://www.eso.org/qi/>). Cubriendo un área de 10 arco-minutos en las coordenadas galácticas; $l = 359.35131400$ & $b = 2.79026059$. O coordenadas ecuatoriales; $\alpha = 17^{\text{h}}33^{\text{m}}18.00^{\text{s}}$ & $\delta = -28^{\text{d}}00^{\text{m}}02.0^{\text{s}}$

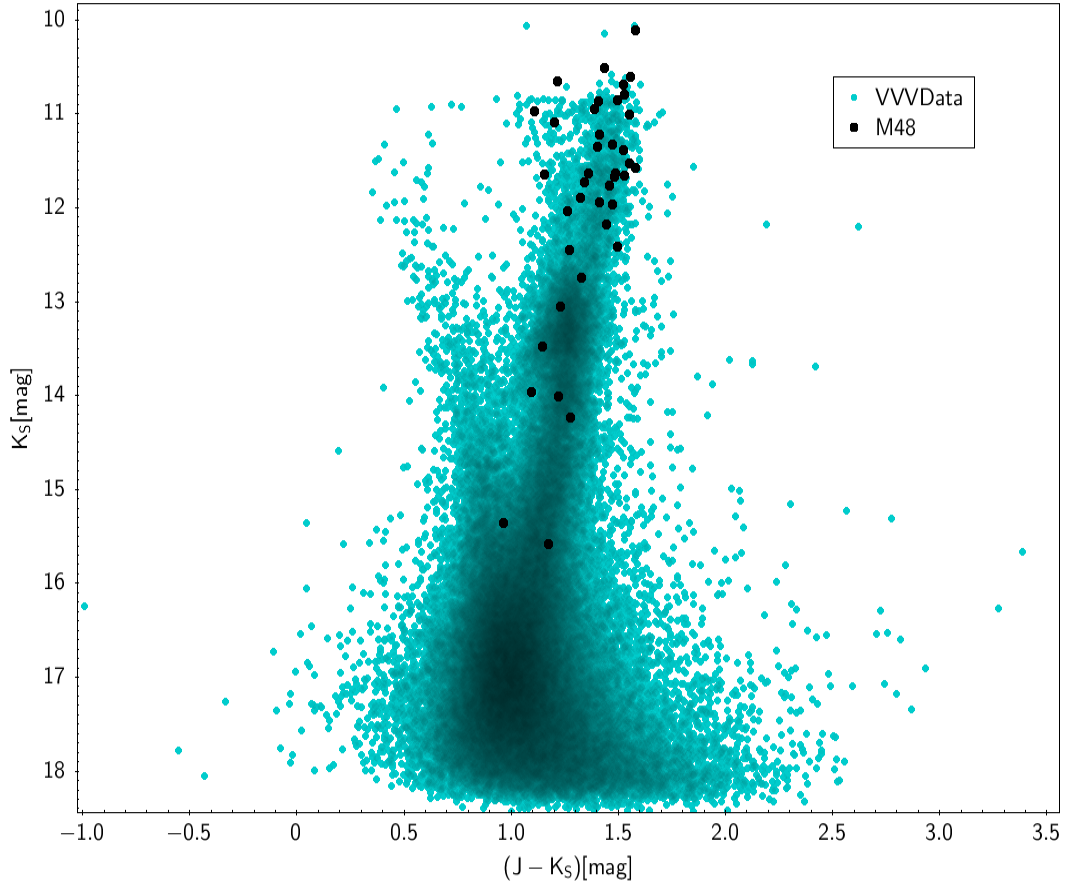


Figura 3: El Diagrama Color Magnitud (DCM) de Minni48 K_s vs. $(J-K_s)$. De los datos obtenidos por el VVV en el infrarrojo cercano en el bulbo galáctico.

2.3 Fotometría para estrellas brillantes en el 2MASS

Para 2MASS la fotometría de estrellas muy brillantes puede traer dificultades, dado que pueden saturar las observaciones, el efecto de las saturaciones lleva a una diferente curva en el DCM, si estas saturaciones son corregidas nos permite añadir más datos para ser analizados (un ejemplo de esto se puede apreciar en el siguiente link: <http://casu.ast.cam.ac.uk/publications/saturated-stars>). Existe una nueva herramienta llamada PSC (Point Source Catalog) que puede cambiar el rango del brillo de las estrellas a casi 20 magnitudes.

La saturación para las bandas J, H y Ks son 4.5, 4 y 3.5 respectivamente, estos valores pudieron ser obtenidos por la segunda liberación de los datos del 2MASS en los cuales pudieron hacer una transformación de los colores señalados con observaciones anteriores, esta transformación es descrita por [Carpenter et al. \(2001\)](#).

Los datos obtenidos son del catálogo 2MASS All-Sky Point Source Catalog (PSC) (<https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-scan?submit=Select&projshort=2MASS>).

Cubriendo un área de 3 arco-minutos en las coordenadas galácticas; $l = 359.35131400$ & $b = 2.79026059$. O coordenadas ecuatoriales; $\alpha = 17h33m18.00s$ & $\delta = -28d00m02.0s$.

2.4 Fotometría de WISE

La fotometría de WISE se hace con un ajuste de perfil de una fuente puntual (realizado por WPRO para estimar la medición del flujo de la fuente puntual bajo todas las circunstancias) y una multi apertura fotométrica realizada por WAPP y obtener mediciones del flujo para cada fuente por cuadro y por banda que será usada por WPRO (http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/prelim/expsup/sec4_3c.html). Esto es realizado en todas las bandas (W1($3.4\mu m$), W2($4.6\mu m$), W3($12\mu m$), W4($22\mu m$)) al mismo tiempo. La sensibilidad (5σ) es mucho mejor a altas latitudes eclípticas afirma [Wright et al. \(2010\)](#), ya que se ocupan estrellas comunes cerca de los polos eclípticos para calibrar la fotometría. El CMD de WISE puede ser observado en la [Figura 4](#).

Los datos son obtenidos del catálogo AllWISE Source Catalog (<https://irsa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/Gator/nph-scan?submit=Select&projshort=WISE>). Cubriendo un área de 3 arco-minutos en las coordenadas galácticas; $l = 359.35131400$ & $b = 2.79026059$. O coordenadas ecuatoriales; $\alpha = 17h33m18.00s$ & $\delta = -28d00m02.0s$

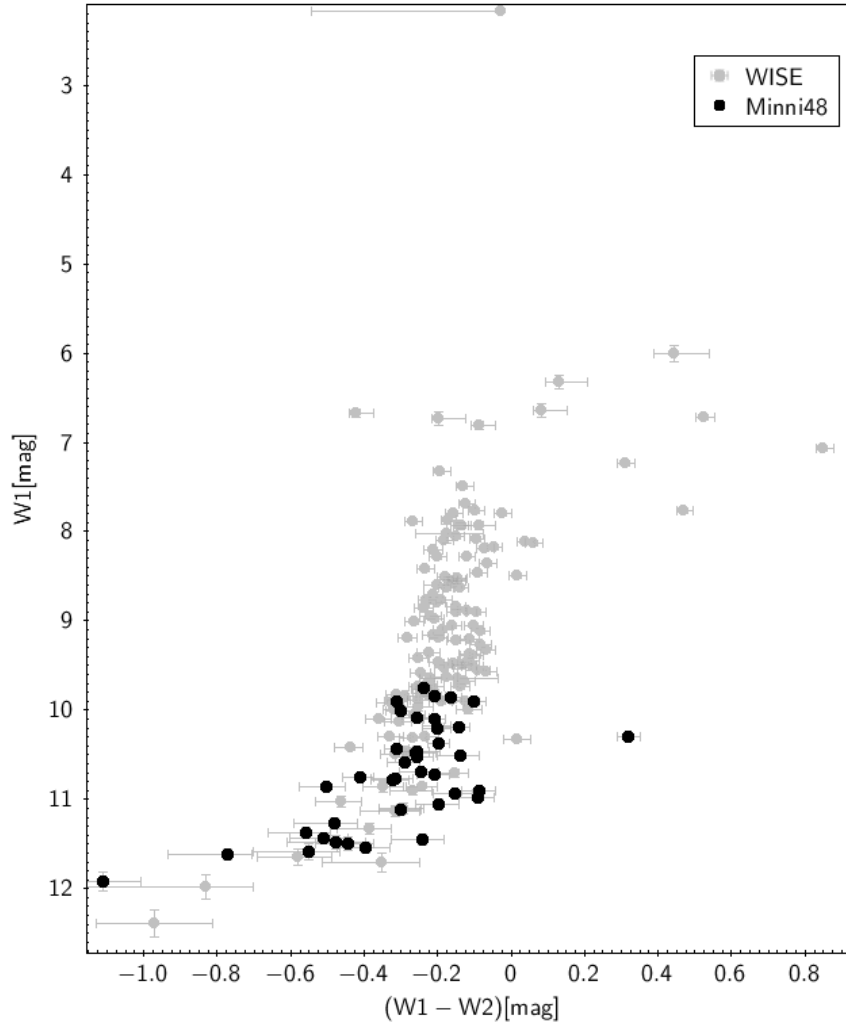


Figura 4: *DCM W1 vs. (W1-W2).* De los datos obtenidos por WISE en el infrarrojo cercano para el cúmulo Minni48 en la región del bulbo galáctico.

2.5 Fotometría y movimientos propios de GAIA

La fotometría de Gaia (Gaia es un telescopio espacial de European Space Agency que mapea la posición de más de 1 billón de estrellas a una alta precisión) contiene las bandas G(Green), G_{RP} (red) y G_{BP} (Blue), las cuales complementan la información a los datos anteriores de GAIA. La fotometría está basada en la calibración misma del sistema interno de los datos de Gaia, seguida de una calibración externa para unir los dos sistemas.

Existen distintas fuentes de fotometría que dependen de la información de color de la fuente, las cuales son: **Gold** (la fotometría fue obtenida con todo el proceso de calibración), **Silver** (no fue obtenido con el proceso completo de calibración, se itera para completar la calibración faltante), **Bronze** (No están calibrados, se pierde la información de color para realizar el proceso de calibración), el proceso es descrito en [Riello et al. \(2018\)](#).

Los movimientos propios (es la medida del cambio de su posición en el cielo) de Gaia son más precisos porque depende solo de los datos de Gaia y no de los del catálogo de Tycho-2, se toma en cuenta el paralaje y los movimientos propios para calcular la posición, independiente que los valores sean aproximadamente cero, las condiciones de los datos dan valores pequeños realistas para los movimientos propios y paralaje, que dependiendo de la magnitud y las coordenadas galácticas de la fuente. Para complementar los datos de posición y movimientos propio, se alinean con el ICRF (international celestial reference frame) proceso descrito por [Brown et al. \(2018\)](#). La fotometría y los movimientos propios se puede apreciar en la [Figura 5](#) y [Figura 6](#) respectivamente.

Los datos son obtenidos con fotometría Gold en su mayoría, muy pocos Silver y ninguno de Bronze porque estos no poseen información de color (<https://gea.esac.esa.int/archive/>). Cubriendo un área de 3 arco-minutos en las coordenadas galácticas; $l = 359.35131400$ & $b = 2.79026059$. O coordenadas ecuatoriales; $\alpha = 17h33m18.00s$ & $\delta = -28d00m02.0s$.

Después de obtener los datos de Gaia, 2MASS, VVV y WISE necesitamos unir los datos, ocupamos el VVV con 2MASS ya que se complementan con filtros parecidos, realizamos un match de las posiciones de estrellas con WISE y Gaia. Así obtenemos la información para cada estrella, cabe destacar que los datos del VVV ya están reducidos, las estrellas seleccionadas están condicionadas por esto último, nuestra selección se basa en el match de posiciones de acuerdo a los datos del VVV, el match arroja más de 100 estrellas la mejor manera de confirmar este cúmulo es observando su DCM y sus movimientos propios.

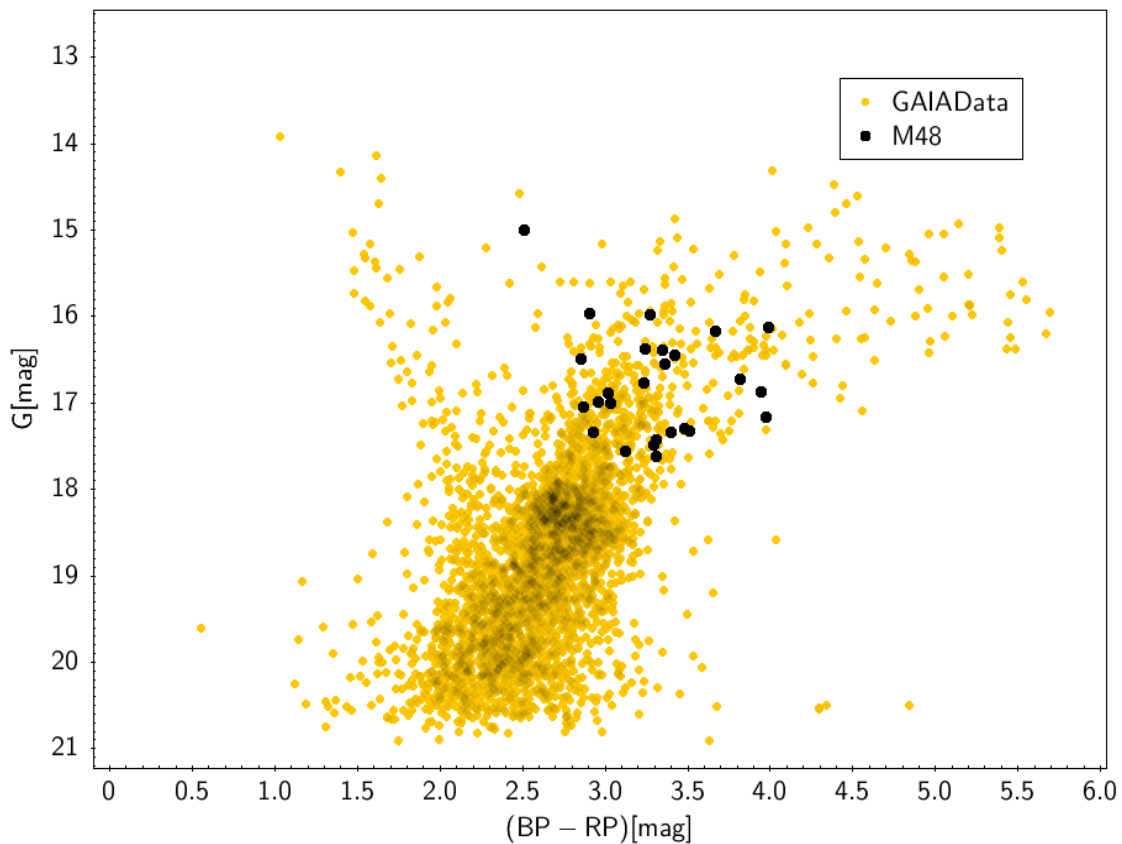


Figura 5: DCM $Gmag$ vs. $(BP-RP)$. De los datos obtenidos por Gaia en el óptico para el cúmulo Minni48 en la región del bulbo galáctico.

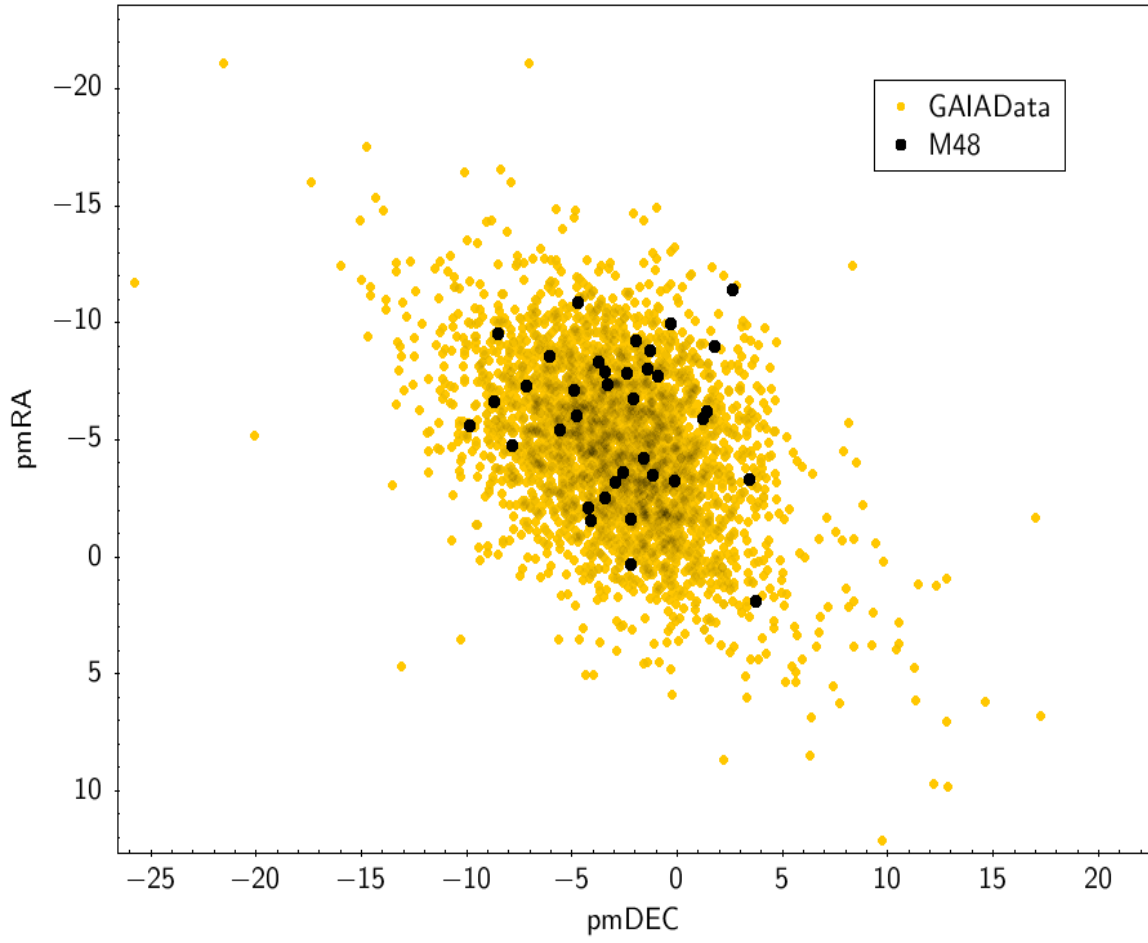


Figure 6: Movimientos propios de los datos obtenidos por Gaia en el óptico para el cúmulo Minni48 con coordenadas: $l = 359.35131400$ $b = 2.79026059$.

Resultados

3.1 Mediciones de enrojecimiento y absorción

Sabemos que la extinción es debido a la absorción del polvo y el scattering de la luz. Podemos calcular la extinción usando BEAM (VVV y 2MASS bulge extinction and metallicity calculator), método usado y descrito por [Gonzalez et al. 2011](#) y [Gonzalez et al. 2012](#). La extinción A_k es calculada con los parámetros del candidato M48 ([Tabla 2](#)).

$$A_k = 0.3987 \pm 0.001$$

Mientras más extinción, más enrojecimiento tendremos. Estudios a lo largo del tema sugieren que la extinción y el enrojecimiento están relacionados por:

$$A_k = 0.528E(J - K_s) \text{ ([Nishiyama et al. \(2009\)](#))}$$

Usando ambos resultados podemos obtener el enrojecimiento:

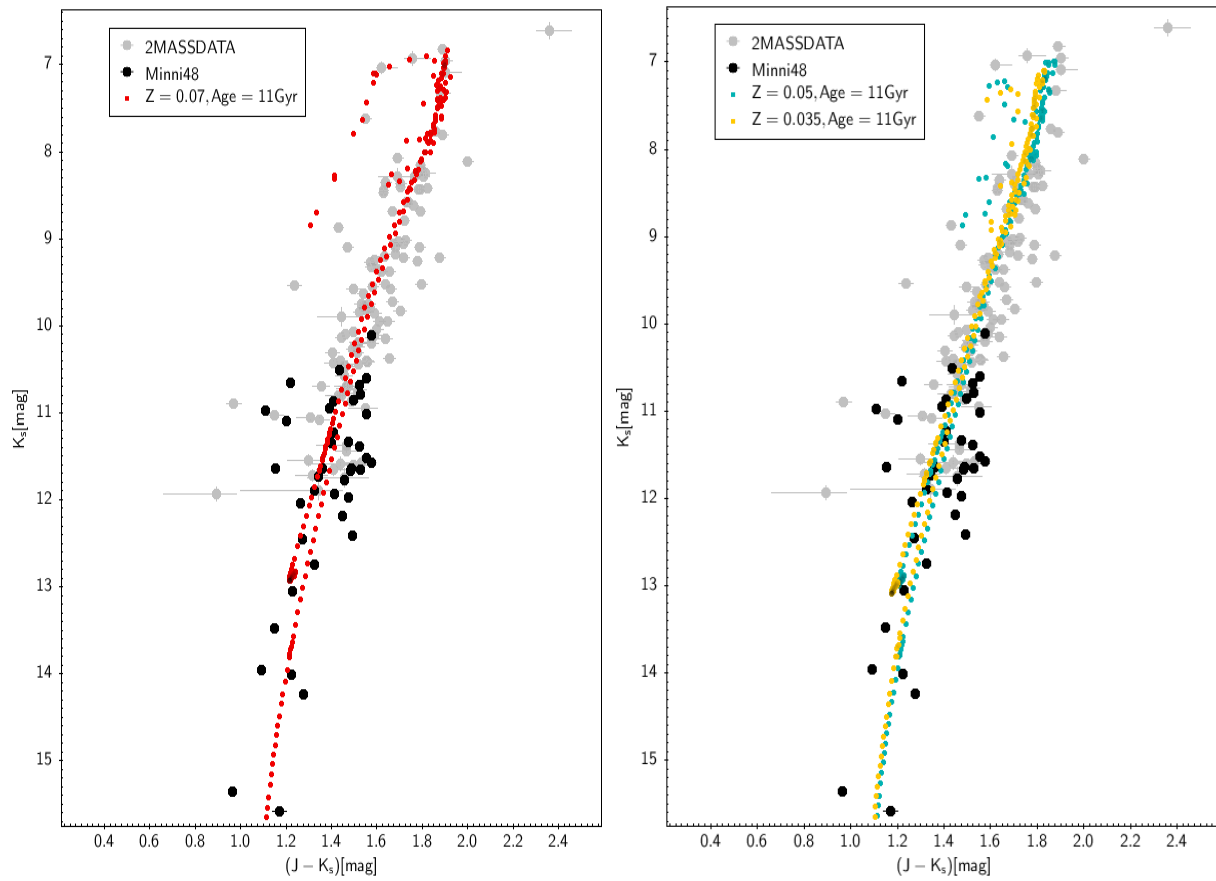
$$E(J - K_s) = 0.7551 \pm 0.1090$$

Para calcular la magnitud absoluta de una estrella a una distancia conocida, se debe ingresar la extinción, ya que la magnitud absoluta es afectada por esta también.

$$m - M = 5 \log d - 5 + A$$

Con estos valores ya tenemos una mejor idea de los efectos de absorción y enrojecimiento, los que posteriormente serán aplicados para obtener la isócrona observada en la [Figura 7](#). Esta isócrona será seleccionada por ajuste visual, podemos notar que el cambio de edad en la isócrona tiene un efecto importante en el turnoff, al no tener un turnoff apreciable la selección de la isócrona se dificulta, lo que nos podría llevar

a una selección no muy precisa. El cambio en la metalicidad no es muy apreciable, pero tiene un efecto significativo en el enrojecimiento.



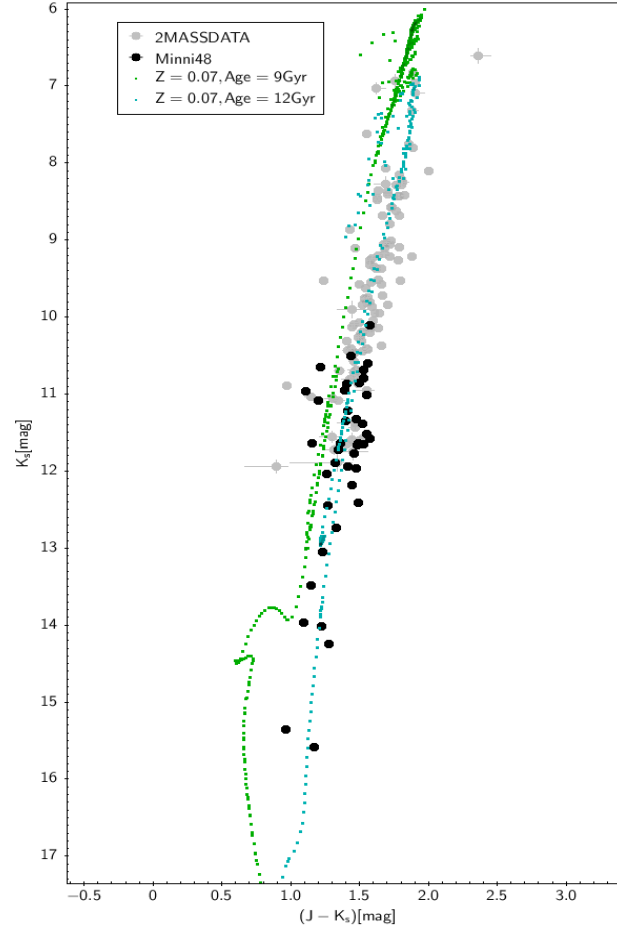


Figura 7: El gráfico muestra el CMD de Minni48 y distintas isócrona de PARSEC en las bandas $(J-K_S)$ vs K_S . (Izquierda, la isócrona seleccionada arbitrariamente por ajuste visual. Centro, isócronas de igual edad, pero distintas metalicidades $Z \sim 0.05$ y $Z \sim 0.035$. Derecha, isócronas de igual metalicidad, pero distintas edades de $9 - 12\text{Gyr}$).

Tabla 2: Muestra las propiedades físicas para el nuevo Cumulo Globular (*Ascensión recta* (α), *Declinación* (δ), *Enrojecimiento* $E(J - K_s)$, *Extinción* (A_k), *Distancia* $D(Kpc)$, *Metalicidad* (Z), *Edad*, *Radio*, *Luminosidad*).

GC	α	δ	$E(J-K_s)$	A_k	$D(kpc)$	Z	$Edad(Gyr)$	$r(pc)$	$L(L_{Sun})$
<i>Minni48</i>	17h33m18.00s	-28d00m02.0s	0.7551	0.3987	7	0.07	11	10	1.5×10^4

3.2 Determinación de la distancia

Para la determinación de la distancia, necesitamos ocupar el método de ajuste isócrona (visual). Las isócronas de nuestro cúmulo fueron computadas por PARSEC descrita por [Bressan et al. \(2012\)](#).

Estas nos ayudaran a obtener los parámetros del CG al ser ajustada visualmente en los gráficos de su DCM, se pueden apreciar trabajos de ajuste de isócrona en [G. Gontcharov et al. \(2018\)](#).

Primero vamos a asumir que este cúmulo está a una distancia de $8kpc$, que es la distancia al centro galáctico desde el sistema solar, con la distancia obtenemos el valor del módulo de distancia:

$$m - M = 14.52 + 0.3987$$

Dado lo anterior y con la extinción ya podemos tener la magnitud aparente que deberían tener las isócronas para hacer un mejor ajuste de los datos ya reducidos del cúmulo. Realizaremos pequeñas modificaciones en la distancia y en el enrojecimiento con el fin de calzar de mejor manera posible la isócrona ([Figura7](#)).

Para calcular la distancia usamos el módulo de distancia de la siguiente forma:

$$d = 10^{0.2(m-M+5-A_k)}$$

Con las estrellas del seleccionada de los datos obtenidos podemos sustraer de la isócrona la magnitudes aparentes, magnitudes absolutas y con el valor del enrojecimiento podemos obtener un valor promedio de la distancia.

$$d \sim 7kpc$$

3.3 Ajuste de isócrona y determinación de la metalicidad y edad

Para estimar la edad, se utiliza mismo método, las isócronas están determinadas para una cierta metalicidad y edad, por lo que el ajuste de la isócrona es de gran importancia, porque se asume que todas las estrellas de un cúmulo son de la misma edad, teniendo en cuenta esto y los valores computados por PARSEC, podemos asumir una edad del cúmulo de:

$$Age \sim 11 \times 10^9 \text{ yr}$$

De la misma forma, para la metalicidad debemos obtener un buen ajuste de la isócrona, hay que tener mucho cuidado por el enrojecimiento interestelar causado por el gas y polvo.

La variación de la metalicidad hace que las isócronas varían en el enrojecimiento interno de la estrella. Este cúmulo tiene una RGB muy poblada, es más rica en metales, por lo que afecta en el enrojecimiento interno de la estrella mucho más y hay que realizar pequeños ajustes que no son determinados por el enrojecimiento interestelar.

$$Z \sim 0.07$$

3.4 Determinación del radio

Podemos determinar distintos radios, como el core radius, que es la distancia desde el centro del cúmulo hasta cuando el brillo superficial del cúmulo se reduce a la mitad.

$$r_c = \sqrt{\frac{9}{4\pi G \rho_0 \beta}}$$

Donde ρ_0 es la densidad central, β y G son constantes. Esta ecuación se asume en un modelo de King donde la estrella sigue el modelo esférico isotrópico (https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept02/Bertin/Bertin22_2.html).

El half-light radius, que es el radio que contiene la mitad de la luz emitida por el cúmulo.

El tidal radius , que es el radio que determina el borde externo en la cual un miembro del cúmulo sentirá más influencia del campo externo gravitacional que la propia gravedad del cúmulo.

También podemos realizar la medición del radio por trigonometría, podemos estimar su radio con el cálculo de la distancia angular, usando los datos posicionales de las estrellas y la distancia, este cálculo del radio es una aproximación y podría cambiar su valor dependiendo de la técnica empleada.

La distancia angular entre dos puntos es una medida de distancia aparente expresada en radianes, que viene dada por su posición en ascensión recta y declinación. Tenemos las coordenadas del centro, calculamos la distancia a la estrella mas distante y obtenemos las segundas coordenadas para calcular la distancia angular entre estos dos puntos.

$$\theta = \cos^{-1}[\sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)]$$

$$\alpha \in [0, 2\pi], \delta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

$$\delta_1 = -28.000056 \quad \alpha_1 = 263,32500$$

$$\delta_2 = -28.004820 \quad \alpha_2 = 263,37973$$

$$\theta \sim 1.4 \times 10^{-3} \text{ arcsec}, \quad r = \theta D \sim 10 \text{ pc}$$

3.5 Determinación de la luminosidad

La luminosidad de las estrellas seleccionadas puede ser calculada usando la magnitud aparente de cada estrella y la distancia al cúmulo. La suma de las luminosidades nos dará la luminosidad total de las estrellas observadas, que debe estar entre el rango de 10^4 a 10^6 luminosidades solares si asumimos que es un cúmulo, esto es porque la función luminosidad de los cúmulos globulares toma este rango de valores, estos valores son apreciados en [M. Rejkuba \(2012\)](#).

$$L = 100^{\frac{M_{sun}-M}{5}} L_{sun} \quad (\text{para cada estrella})$$

$$L_T \sim 1.5 \times 10^4 L_{sun}$$

Donde $M_{sun} = 3.29$ (en la banda Ks)

Todas las propiedades físicas calculadas están recopiladas en la [Tabla 2](#).

Discusión

4.1 Problemas con la medición del enrojecimiento y la ley de extinción

Como es sabido en el medio interestelar, la extinción no es solo debido a la absorción, las partículas de polvo absorben y escatarean la luz azul, ya que éstas tienen un tamaño comparable con esa longitud de onda. Dado lo anterior, los objetos parecen estar más enrojecidos de lo que son realmente, lo que se conoce como el enrojecimiento interestelar. Para los datos obtenidos de las longitudes de ondas es de vital importancia tener en cuenta este proceso, ya que nos pueden llevar a cálculos erróneos de los valores.

El enrojecimiento se puede calcular con la comparación entre el índice de color con su verdadero:

$$E(J - K_s) = (J - K_s) - (J - K_s)_0$$

$$A_k = 0.528E(J - K_s)$$

Esto explica que ciertos lugares como el centro galáctico tienen dificultad observacional debido al polvo y el gas excesivo, por lo que estos lugares solo han podido ser estudiados por los instrumentos de radio e infrarrojo.

4.2 Problemas en determinar distancias con distintos métodos

Existen diferentes métodos para calcular la distancia hacia un cúmulo, se pueden obtener distancias usando el paralaje estelar, distancia lumínica, RR Lyrae, calibración con la Gran Nube de Magallanes, ajuste de enanas blancas, modelo de rama horizontal teórica, etc.

El paralaje estelar consiste solo en la geometría de la tierra orbitando el sol. Uno de los mayores problemas de determinar las distancias con paralaje es la posibilidad de tener

valores negativos, esto resultara en estimaciones de distancias que fueron manejadas incorrectamente.

La distancia lumínica es un estimado indirecto ya que lo único observable del objeto es el brillo aparente, lo desconocido es la luminosidad.

Es posible obtener la distancia con estrellas variables periódicas, las cuales poseen un brillo que varía regularmente con un periodo característico. Por ejemplo, para las RR Lyrae que se encuentran en cúmulos viejos, estas estrellas son más débiles que las cefeidas, por lo que son standard candles para distancias cercanas, estas estrellas no son perfectamente standard candles porque su magnitud absoluta es una función de la metalicidad, existen diferentes técnicas para determinar la magnitud de estas estrellas y así poder calibrar bien los instrumentos y usarlas para determinar distancias a cúmulos globulares.

La Gran Nube de Magallanes posee RR Lyrae y pueden ser usadas para calibrar la magnitud absoluta, combinando la distancia actual hacia la Gran Nube de Magallanes y las distancias hacia las RR Lyrae es posible determinar su magnitud absoluta en función a su metalicidad.

Para el ajuste de enanas blancas, es primordial obtener la fotometría de las enanas blancas del cúmulo, usar su paralaje para determinar su magnitud absoluta y usar un método similar al de ajuste de isócronas de secuencia principal, la clave de este método es la masa de las enanas blancas.

Para el modelo de rama horizontal teórico, es importante la abundancia de helio porque el calculo es muy sensible a esto y los modelos estelares, un cambio en la abundancia de la secuencia principal es un efecto directo a la predicción de la luminosidad en la rama horizontal, estos diferentes métodos son descritos por [B. Chaboyer \(1998\).](#)

4.3 Problemas en la determinación del tamaño y la contaminación de fondo

La contaminación del fondo por objetos es un problema potencial a cualquier análisis. La contaminación por objetos tiende a llevar a una distribución de edades jóvenes, esto porque las estrellas que contaminan en general son estrellas más cercanas que tiene una luminosidad comparable y puede llevar a un cálculo erróneo del turnoff de la secuencia principal, más aún afecta a la función luminosidad de los cúmulos globulares ya que tiene directa relación con el turnoff de la secuencia principal describe [A. E Piskunov \(2004\)](#). Puede llevar a la determinación errónea del tamaño, dado que la contaminación puede hacernos creer que el objeto pertenece al GC, otro problema con la determinación del tamaño es la posibilidad de tener la mayor cantidad de decimales en las mediciones, ya que la forma de calcular el tamaño mediante distancias angulares es sumamente sensible a los decimales, el cúmulo Minni48 se ve afectado por estas contaminaciones es una de las razones que el gráfico de movimientos propios se vea tan disperso y no podamos ajustar bien la isócrona por la falta del turnoff.

4.4 Problemas con la determinación de la edad y luminosidad

La función luminosidades de los cúmulos globulares (GCLF), es una función que nos indica el número de cúmulos globulares por intervalo de luminosidad, es importante para el estudio del DCM, el peak de la GCLF ocurre a una luminosidad constante, que es usado como indicador de distancia. Es importante completar el estudio de las mediciones y determinar las estrellas de campo que contaminan los datos. Si no se considera lo anterior, la cola débil de LF se puede ver afectada, lo que perjudicara el estudio del DCM del CG.

Hay muchas incertidumbres de edades y distancias en los CG. Existe una degeneración entre edad, distancia y enrojecimiento debido al método de ajustar isócrona, se puede simular diferentes edades simplemente poniendo al CG cerca o más lejos, el no tener un turnoff definido introduce más incertidumbre al ajuste, por lo que se dificulta la precisión de valores de edades y distancias, este procedimiento introduce incertidumbres propias.

En los CG la RGB es bien definida, CG con alta metalicidad muestran un RGB más superficial (no profunda) y enrojecida que los de baja metalicidad. Las estrellas gigantes de alta metalicidad tienen una opacidad alta debido a los electrones de los metales, los cuales permiten mantener el equilibrio hidrostático a bajas temperaturas.

Todos estos problemas que actúan sobre la distancia nos acarrearán errores en el cálculo de la luminosidad, edad y magnitud absolutas. Para resolverlo es necesario complementar lo obtenido con otras herramientas de medición, buscar una mejor descontaminación de estrellas, identificar más estrellas del cúmulo propuesto, tratar de obtener la curva del turnoff, calcular distancias con métodos más precisos, con estas herramientas nuevas pueden acelerar la confirmación de este cúmulo ya que se obtendría un mejor ajuste de la isócrona y veríamos un gráfico de movimientos propios menos disperso.

Conclusiones

Presentamos la fotometría multicolor para el CG, recientemente encontrado por el VVV, describiendo la observación, la obtención de los datos, la complementación de los datos y las limitaciones e incertidumbres de los parámetros físicos. El análisis del DCM revela que es un GC rico en metales, con una edad cercana a 11Gyr , con metalicidad aproximada de $Z\sim 0.07$. Este se encuentra en el bulbo galáctico de la MW aproximadamente a 7kpc de la tierra. Para realizar la confirmación de este CG con estas características necesitamos un método mas factible para realizar la reducción de los datos o su descontaminación, los movimientos propios dispersos nos indica que es necesario un mejor procedimiento en la descontaminación porque estas estrellas parecen estar dispersas y no pertenecer al cúmulo. A pesar de que se obtuvo resultados muy cercanos a los de un cúmulo globular, se necesita indagar en otras técnicas de medición de distancia. Con los datos de Gaia y movimientos propios sería factible la búsqueda de RR Lyrae y obtener una distancia mas precisa, porque con la falta de turnoff de la secuencia principal se hace muy difícil el ajuste visual de la isócrona.

El VVV dispone de 3 bandas (J, H, K_s) que se complementan con otros surveys como WISE, 2MASS y Gaia, cada uno entrega informaciones que son valiosas en el campo observado, lo que permite un mayor análisis para el DCM de los CG encontrados a futuro.

La confirmación de este cúmulo en el futuro ayudara a completar aún más la información obtenida acerca de la evolución dinámica de la galaxia, ayudara a mapear y entregar información acerca del proceso de formación, tiempo de escala de formación estelar en la nube progenitora y más.

Referencias

[1] An introduction to modern Astrophysics, W. Carroll – A.Ostlie

[2] [D. Camargo, Five New Globular Clusters Discovered in the Galactic Bulge. En AJ, 860:L27 \(5pp\), \(Jun. de 2018\).](#)

[3] [R.K Saito, VVV DR1: The first data release of the Milky Way bulge and southern plane from the near-infrared ESO public survey VISTA variables in the Vía Láctea. En A&A 537, A107, \(Ene. de 2012\)](#)

[4] D. Minniti, New VVV Survey Globular Cluster Candidates in the Milky Way Bulge. En AJ, 849:L24(6pp), (Nov. De 2017).

[5] [D. Minniti, Confirmation of a New Metal-poor Globular Cluster in the Galactic Bulge. En AJ, 866:12 \(12pp\), \(Oct. de 2018\).](#)

[6] [J. Carpenter, Color Transformations for the 2MASS Second Incremental Data Release. En AJ, 121 : 2851-2871, \(May. de 2001\).](#)

[7] [E. Wright, The Wide-field Infrared Survey Explorer \(WISE\): Mission Description and Initial On-orbit Performance. En AJ, 140:1868–1881, \(Dec. De 2010\).](#)

[8] [M. Riello, Gaia Data Release 2 Processing of the photometric data. En A&A 616, A3, \(Ago. de 2018\).](#)

[9] [A. G. A. Brown, Gaia Data Release 2 Summary of the contents and survey properties. En A&A 616, A1, \(Ago. de 2018\).](#)

[10] [C. Jordi, Gaia broad band photometry. En A&A 523, A48, \(Ago. de 2010\).](#)

- [11] [O. A. Gonzalez, Reddening and metallicity maps of the Milky Way bulge from VVV and 2MASS I. The method and minor axis maps. En A&A 534, A3, \(Sep. de 2011\).](#)
- [12] [O. A. Gonzalez, Reddening and metallicity maps of the Milky Way bulge from VVV and 2MASS II. The complete high resolution extinction map and implications for Galactic bulge studies. En A&A 543, A13, \(Jun. de 2012\).](#)
- [13] [A. Bressan, PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. En MNRAS 427, 127–145 \(Nov. de 2012\).](#)
- [14] [S. Nishiyama, Interstellar Extinction Law toward the Galactic Center III: J, H, Ks bands in the 2MASS and the MKO systems, and 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 micron in the Spitzer/IRAC system. En ApJ 696 1407, \(Feb. de 2009\).](#)
- [15] [N. Suntzeff, The Chemical Homogeneity of Stars In Galactic Globular Clusters. En ASP Conference Series, Vol. 48, 1993.](#)
- [16] [N.R. Arakelyan, Spatial Distribution of Globular Clusters in the Galaxy. En MNRAS 000, 1-11, \(Mar. de 2018\).](#)
- [17] A Savino, Gaia DR2 Orbital Properties for Field Stars With Globular Cluster-like CN Band Strengths. En A&A 624, L9, (Abr. de 2019).
- [18] [M. Rejkuba, Globular Cluster Luminosity Function as Distance Indicator. En AP&SS 341:195, \(Sep. de 2012\).](#)

[19] [Chaboyer B, Globular Cluster Distance Determinations. En ASSL vol 237, \(Ago. de 1998\).](#)

[20] A. E. Piskunov, On The Determination of Age and Mass Functions of Stars in Young Open Star Clusters from the Analysis of Their Luminosity Functions. En MNRAS 349,1449-1463, (Ene. de 2004).

[21] [G. Gontcharov, Isochrone fitting of Galactic globular clusters – I. NGC 5904. En MNRAS 483, 4949-4967, \(Dec. de 2018\).](#)